

PRUEBAS DE CARGA NO DESTRUCTIVAS EN PILOTES

NON-DESTRUCTIVE TEST IN PILOTES

LUIS IBÁÑEZ MORA

*Departamento de Ing. Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas, Cuba
ibanez@uclv.edu.cu*

Recibido para revisar Abril 19 de 2007, aceptado Noviembre 31 de 2007, versión final Febrero 05 de 2008

RESUMEN: En el presente trabajo se abordan las experiencias en la utilización de la modelación matemática y la realización de pruebas de carga no destructivas en cimentaciones sobre pilotes para evaluar su capacidad de carga. Para ello se exponen los resultados obtenidos en pruebas de carga de más de 200 Toneladas, y la distribución de cargas en una estructura portuaria, evaluando su capacidad resistente. Se establecen comparaciones entre los métodos teóricos de cálculo de la capacidad de carga del pilote aislado y modelos matemáticos, así como los resultados de la pruebas de carga a escala real.

PALABRAS CLAVE: Cimentación, Pilotes, Modelación.

ABSTRACT: Experiences using mathematical modeling and non-destructive load testing of pile foundations in docks are presented in order to evaluate their bearing capacity. The results obtained in load tests with more than 200 tons are presented, as well as load distribution for a dock structure and the assessment of its bearing capacity. Comparisons are made between theoretical calculation methods, mathematical models for calculating the bearing capacity of isolated piles, as well as the results obtained from load testing using a real scale.

KEY WORDS: foundation, modeling, pile.

1. INTRODUCCIÓN

El acelerado desarrollo tecnológico técnica ha traído consigo el surgimiento de nuevos equipos de izaje y transportación, por lo que instalaciones portuarias que fueron diseñadas para un sistema de carga, deben ser evaluadas para su explotación bajo nuevos regimenes de mayor magnitud. Este el caso del espigón No 8 del Puerto del Mariel, Cuba, construido a finales de 1980. En el mismo se pretende poner en la explotación un equipo de izaje, capaz de transmitir hasta 225 toneladas por uno de sus apoyos, mucho mayor a las dos grúas de 40 Toneladas con las que se explota dicho puerto. Por tal motivo se hace necesario evaluar la capacidad de carga de los pilotes, y demás elementos estructurales, para comprobar si el muelle es capaz de soportar las nuevas solicitaciones.

Para dar cumplimiento a dicha tarea especialistas de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicada (ENIA) y de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), proyectaron, modelizaron y ejecutaron pruebas de carga no destructivas a los pilotes de la estructura.

2. DESARROLLO

El espigón No 8 del Puerto del Mariel, es una estructura portuaria conformada por pilotes y una pared de tablestaca, que forman la cimentación, sobre la cual descansa un reticulado espacial conformado por vigas cabezales y la losa del muelle. Además están presentes otros elementos estructurales, como bolardos y pilotes inclinados para tomar los efectos de cargas horizontales.

El hecho de poner en explotación una grúa de 900 Ton de capacidad, con cuatro puntos de apoyo de 1.2 m x 5.4m espaciados a 12 metros

cada uno, generará solicitaciones muy superiores para las cuales fue diseñada la estructura.

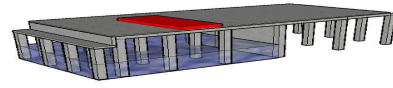
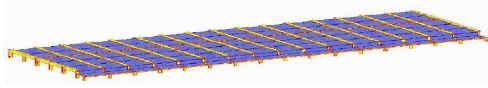


Figura 1. Esquema del muelle y la posición de la carga
Figure 1. Dock and load position diagram

En el caso que nos ocupa, la revisión de la cimentación, se evidencia que las cargas a nivel de pilotes se incrementan considerablemente, lo que imposibilitaría la explotación del nuevo equipo de izaje. Realizar un análisis plano para el cálculo de las solicitaciones, conduciría a resultados engañosos, pues por la forma y magnitud de la carga, y el reticulado, viga - losa, las solicitaciones a nivel de pilotes deben distribuirse en los pilotes bajo los el área cargada.

A continuación se muestra la reacción máxima por pilote en función de la carga por apoyo de la grúa.

Tabla 1. Determinación de la carga máxima a nivel de pilote

Table 1. Determination of the maximum load of a pile

No	Carga actuante (Ton)	Presión (kg/cm ²)	Reacción por pilote (T)
1	55	0.55	24
2	110	1.11	31
3	165	1.66	38
4	220	2.22	45
5	275	2.77	52
6	330	3.33	59

Por ello se realiza una modelación espacial de muelle (3D) donde se tienen en cuenta todos los elementos componentes del muelle, trabajando de forma conjunta, lo que sin duda alguna se corresponde con el comportamiento real de la estructura. Además se analizan las diferentes posiciones de la grúa y su desplazamiento sobre la estructura.

Se evidencia un trabajo espacial de la estructura, generándose concentración de tensiones en los puntos bajo el apoyo de la grúa, sin influir un apoyo sobre otro cercano.

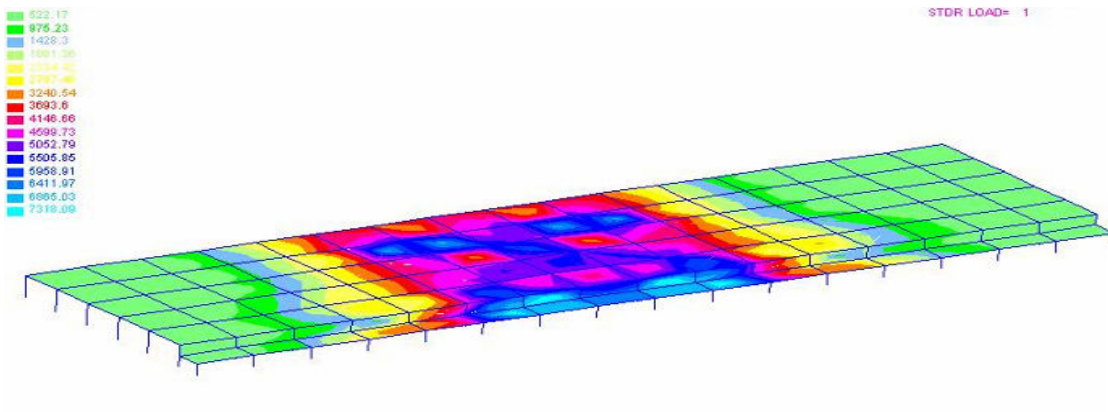


Figura 2. Distribución de tensiones en la losa del muelle
Figure 2. Stress distribution on dock

Estos resultados arrojan que para las solicitaciones que genera el equipo, el pilote más

esforzado estará sometido a una carga en el orden de las 50 Toneladas

2.1 Características de la estratificación

Los resultados de las Investigaciones Ingeniero Geológicas [3][4], muestran la presencia de varios estratos de cieno, arcilla y argilita en el lugar, variando el espesor de los mismos en toda la dirección del puerto, como se muestra en la figura 3.

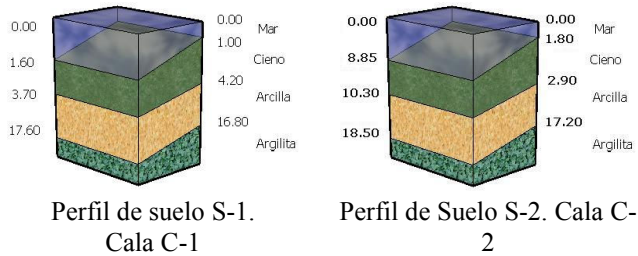


Figura 3. Perfiles de suelo
Figure 3. Soil profiles

A continuación se muestran las características físicas mecánicas de los suelos estudiados:

Tabla 2. Características físico mecánicas de los suelos

Table 2. Physical and mechanical soil properties

	Tensiones totales	Tensiones efectivas
Arcilla	$\phi = 15^\circ$ $C = 30 \text{ kPa}$	$\phi = 0^\circ$ $C = 80 \text{ kPa}$
Argilita	$\phi = 12^\circ$ $C = 160 \text{ kPa}$	$\phi = 0^\circ$ $C = 180 \text{ kPa}$

Conociendo que los pilotes hincados en el lugar tienen una longitud mínima de 22 metros, se definiendo como condición más crítica la cala C-2 donde el estrato de argilita se encuentra a una profundidad de 21 metros, por lo que el pilote atraviesa 14 metros de arcilla y penetra 1 metro en la argilita. A partir de estos datos se procede al cálculo de la capacidad de carga del pilote, por métodos clásicos y la modelación por el método de los elementos finitos (MEF).

En el caso de la modelación por MEF se realizó teniendo en cuenta las recomendaciones siguientes [Mesat 1993 a, b]:

- 1 Los límites verticales de la malla deben ser fijados al menos dos veces la altura o el

largo (L) del pilote y el límite vertical inferior al menos dos veces el lado L debajo del punto (3L desde la superficie), porque las condiciones límites de los desplazamientos no influyen sobre el comportamiento del pilote.

- 2 La interacción entre el pilote y el suelo (cara y el punto) son representados por los elementos finitos de interacción compatibles con los elementos más utilizados para describir el suelo (Elementos de interfase).
- 3 La malla de un pilote aislado debe ser relativamente estrecha cuando se acerca a las interacciones, quiere decir, a la punta del pilote y a lo largo de la cara del mismo.
- 4 La relación entre la forma (relación de la menor dimensión de un elemento con la mayor dimensión) de los elementos cerca del pilote deberá estar limitado a 1/5.
- 5 El lado B (según la dirección horizontal) del primer elemento directamente adyacente al pilote debe ser al menos tal que $B=0.1D$ donde D es el diámetro del pilote. En la figura 4 se puede apreciar lo anterior expuesto.

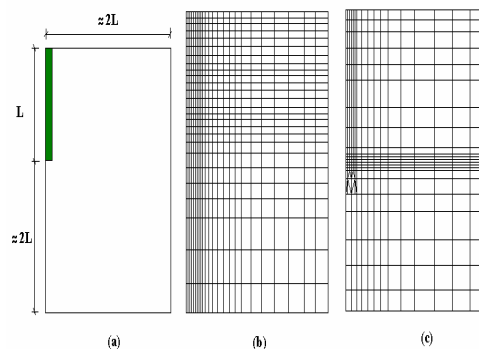
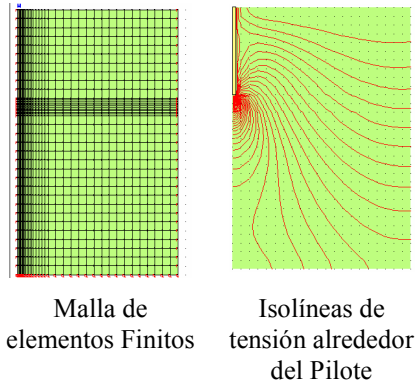


Figura 4. Representación del modelo axial-simétrico para el caso del pilote simple
Figure 4. Axisymmetric model for a single pile

A partir de estas recomendaciones se realiza la modelación de la cimentación (Figura 5), determinado la capacidad de carga del pilote.



Malla de elementos Finitos Isolíneas de tensión alrededor del Pilote

Figura 5. Modelación por Elementos Finitos

Figure 5. FEM model

A continuación se exponen los resultados obtenidos en el diseño de la capacidad de carga del pilote aislado utilizando diferentes formulaciones y normas:

Tabla 3. Capacidad de carga por diferentes métodos F.S- Factor de Seguridad, EL- Estados Límites

Table 3. Load capacity using different methods FS- Safety factor, EL- Limit States

Normativa	Q ULTIMA (T)	Q TRABAJO (T)	F.S.
Propuesta de Norma [7]	129.6	61.4	EL
Sowers [8]	170.6	56.8	3
Caquot Kerisel [1]	170.8	56.9	3
MEF [2]	131.2	65.6	2
Promedio	150.5	60.2	

Como se aprecia la carga última de los pilotes esta en el orden de las 150 Toneladas, para una carga de trabajo de 60.2 Ton, que en todos los casos es superior a la carga a soportar por el

pilote más esforzado, según los resultados de la modelación estructural vista anteriormente. Corresponde comprobar a través de la Prueba de Carga la validez de estos resultados.

2.2 Ensayos y resultados de la Prueba de Carga

Una vez determinada experimentalmente la capacidad de carga última y de trabajo del pilote, se realiza la modelación de la prueba de carga en el ordenador, estimando la curva Carga vs. Deformación (Tabla 4). Con estos resultados se orienta y ejecuta la prueba de carga, prestando especial atención a las deformaciones que se generan.

Tabla 4. Carga vs. Deformación del pilote

Table 4. Load vs. Pile deformation

Punto	Carga (Ton)	Deformación (mm)	
		Modelo	Prueba de Carga
1	0.0	0.00	0.00
2	20.0	0.65	0.40
3	30.0	0.68	0.50
4	61.8	0.86	0.90
5	67.8	0.87	1.00
6	90.0	1.23	1.20
7	107.0	1.24	1.30
8	142.0	1.58	1.60
9	143.3	1.60	1.70

La prueba de carga se realizó en el mes de noviembre del año 2002, logrando una carga total de 170 Ton, aprovechando algunos bultos existentes en el lugar. (Ver Figura 6)



Figura 6. Prueba de carga “in situ”

Figure 6. “In-situ” load test

Una vez realizada la prueba de carga se plotean los resultados del ensayo y el modelo, observándose la coincidencia entre ambos resultados.

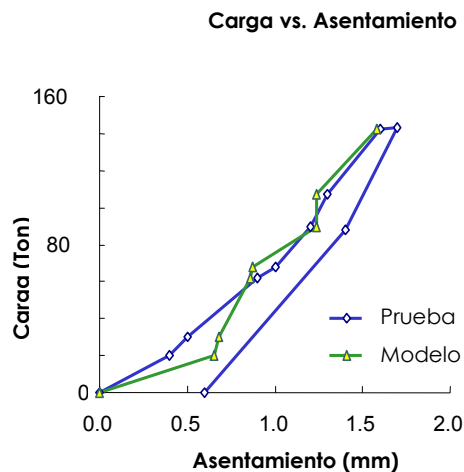


Figura 7. Curva Carga vs. Asentamiento de la Prueba de Carga y la Modelación

Figure 7. Load vs. Load-settlement curve and modelling

Estos resultados evidencian la similitud entre la prueba de carga y la modelación, comprobándose que las deformaciones en el pilote son menores a 2 mm, por lo que pueden soportar las nuevas cargas que sobre los mismos actúan.

3. CONCLUSIONES

Una vez realizado todos los cálculos se arriban a las siguientes conclusiones:

1. A partir de los resultados obtenidos de la modelación y de la prueba de carga queda demostrado que el muelle tiene continuidad estructural lo que permite un trabajo espacial del mismo que garantiza una mejor redistribución de las cargas que actúan sobre él.
2. Las deformaciones obtenidas a partir de la prueba de carga coinciden ingenierilmente con el modelo que considera que los mismos están apoyados en el estrato de argilita por lo que no existe dudas de que serán pilotes trabajando en punta, con

capacidad de carga obtenida a partir del análisis de diferentes métodos de 60 Toneladas

3. A través de la modelación y la instrumentación se pueden realizar pruebas de cargas no destructivas en elementos estructurales, en este caso los pilotes, garantizando la utilización posterior de los mismos.

REFERENCIAS

[1] CAQUOT, A AND KERISEL, J. (1964): Tratado de Mecánica de Suelos. 1ed en castellanos. Gaunther-Villars, Paris, France.

[2] IBAÑEZ MORA, L (2001): Modelación matemática de las cimentaciones sobre Pilotes. Aplicaciones. ISPJAE. Cuba. Tesis de Doctorado. 98 pág.

[3] Informe Ingeniero Geológico. 7 de mayo de 1980. Atrache de carga general. ENIA.

[4] Informe Ingeniero Geológico. Atrache de carga general # 2. 20 de marzo de 1982. ENIA

[5] MESAT, P. (1993a): Combinaciones de elementos finitos para las obras geotécnicas. Consejos y recomendaciones. Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 212 (Julio- Agosto), p. 39-64.

[6] MESAT, P. (1993b): Modelos de elementos finitos y problemas de convergencia en el comportamiento no lineal. Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 214 (Nov-Dic), p. 34-56.

[7] Ministerio de Educación. Anteproyecto de Norma Cubana (1989): Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico. Ministerio de Educación. Cuba. Editorial Pueblo y Educación, 50 p.

[8] SOWERS, G Y SOWERS F. (1977): Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.